

УДК 620.192.46

**П. Ясній, докт.техн.наук; Ю. Пиндус, канд.тех.наук;  
І. Окіпний; І. Шульган**

*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

**ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОГО ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО  
НАВАНТАЖЕННЯ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНИЙ СТАН  
У ВІСТРІ ТРІЩИНИ**

*Досліджено вплив попереднього термомеханічного навантаження (ПТН) і комбінованого (з накладанням циклічної складової) ПТН на напружено-деформівний стан (НДС) у вістрі тріщини теплостійкої сталі 15Х2МФА. НДС досліджували методом скінченних елементів у пружно-пластичній постановці. Виявлено, що комбіноване ПТН призводить до зростання пластичних деформацій і залишкових стискувальних напружень після розвантаження, а після прикладання зовнішнього навантаження того ж рівня до зменшення рівня нормальних напружень і еквівалентних напружень за Мізесом спереду вістря тріщини, порівняно із ПТН.*

**P. Yasniy, Yu. Pyndus, I. Okipny, I. Shulhan**

**THE INFLUENCE OF WARM PRE – STRESS ON STRESS – STRAIN  
STATE AT THE CRACK TIP**

*Influencing of the warm pre-stress (WPS) and combined WPS (with low – amplitude cyclic component) on the stress – strain state in the near crack tip of heat – resistance 15Cr2MFA steel. The stress – strain distribution were investigation using the finite element method in the elastic-plastic analysis. The combined WPS causes increasing plastic strain and residual compression stresses, and also reduction of normal and equivalent stresses of Mises compared with WPS.*

Попереднє термомеханічне навантаження полягає в навантаженні тіла з тріщиною за температури, яка перевищує температуру в'язкокрихкого переходу і призводить до значного підвищення опору матеріалів крихкому руйнуванню [1]. Ця проблема досить актуальна для атомної енергетики, оскільки в процесі експлуатації метал корпусу реактора в активній зоні піддається інтенсивному нейтронному опроміненню, яке призводить до окрихчення і підвищення температури зміни характеру руйнування від крихкого до в'язкого. Внаслідок цього крихке руйнування матеріалів корпусів можливе при аварійних режимах роботи, коли необхідне заливання холодної води в корпус реактора.

Проблемі підвищення опору теплостійких сталей крихкому руйнуванню після попереднього термомеханічного навантаження присвячено ряд робіт [2-9]. Як встановлено авторами [2-4], підвищення опору крихкому руйнуванню після ПТН зумовлене зміною напружено-деформівного стану у вершині тріщини, тобто: наведенням залишкових стискуючих напружень, затупленням вершини тріщини і деформаційним зміцненням матеріалу попереду вершини.

У загальному випадку ефект ПТН зумовлений такими чинниками: а) при високих температурах утворюється холоднодеформована структура, яка стійкіша до руйнування сколювання, тобто попередня деформація розтягу зміцнює матеріал; б) після ПТН змінюється геометрія тріщини, так як вона затуплюється і змінює НДС зразка; в) на стадії розвантаження в околі тріщини виникають залишкові стискуючі напруження [1].

Метою даної роботи було дослідження методом скінченних елементів НДС у вістрі тріщини за різних режимів ПТН.

### Методика дослідження

Розрахунки МСЕ виконували з використанням програмного комплексу ANSYS. Для дослідження використовували компактні зразки товщиною 19 мм, виготовлені із сталі 15Х2МФА ( $\sigma_{0,2} = 900$  МПа,  $\sigma_b = 1000$  МПа при  $20^0$  С) (рис. 1). На рис. 2 подано повномасштабну скінченноелементну симетричну модель половини компактного зразка з тріщиною для розрахунків МСЕ.

При розбивці моделі використовували восьмивузловий двовимірний елемент Plane82, якому надали властивостей пластичності та великих деформацій. Розрахунки проводили за умов плоскої деформації, враховували ефект Баушінгера та ефект кінематичного зміцнення матеріалу. У вістрі тріщини сітку елементів згущували для збільшення точності розрахунків. Мінімальний розмір елемента дорівнював 50 мкм, що відповідає приблизно половині розміру зерна сталі 15Х2МФА [10]. Зусилля прикладали до горизонтальної площадки половини отвору під захоплювач у вигляді еквівалентного зусилля тиску (рис. 2).

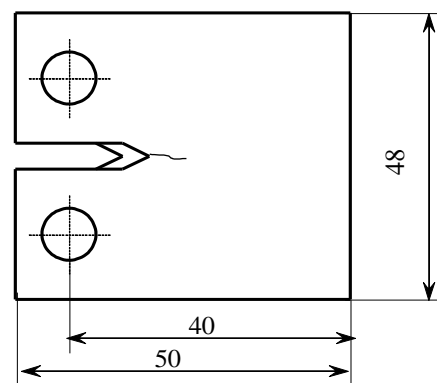


Рисунок 1 - Компактний зразок для випробувань.

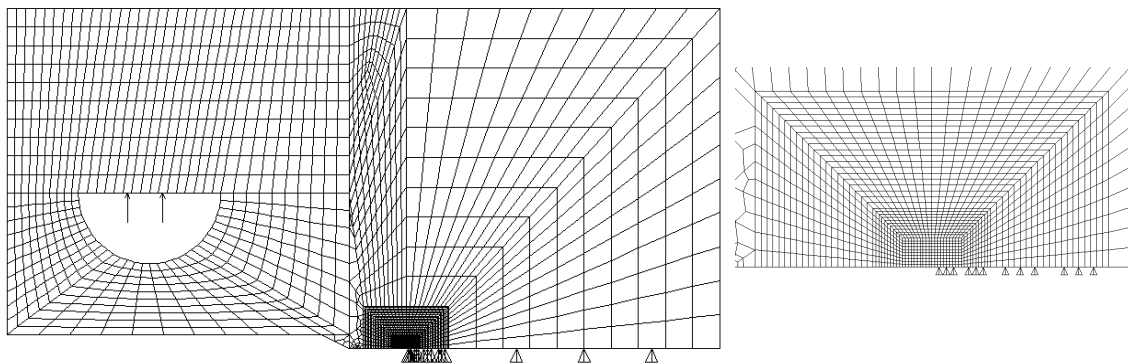


Рисунок 2 – Скінченноелементна модель компактного зразка з тріщиною.

Переміщення площини росту тріщини обмежували у вертикальному напрямку (вздовж осі Y). Площина, вільна від обмежень, вважається тріщиною.

Для адекватного відтворення поведінки матеріалу за різних температур і режимів навантаження використовували істинні експериментальні діаграми деформування матеріалу (рис. 3).

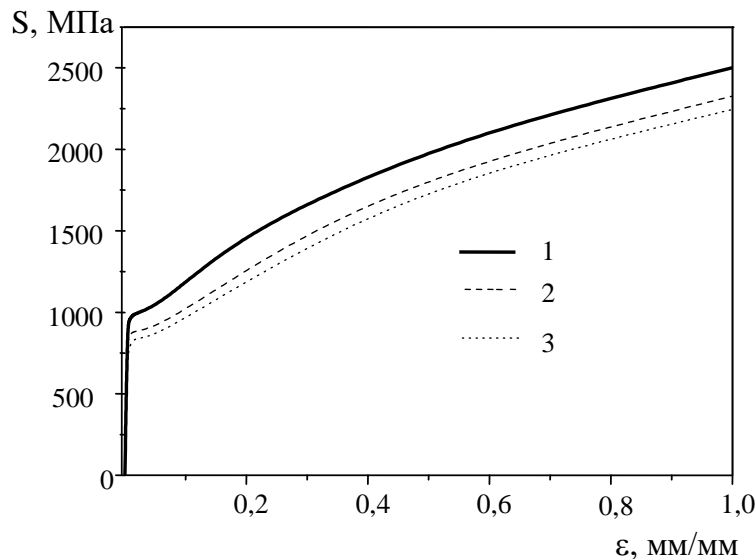


Рисунок 3 - Істинні діаграми деформування розтягом (1, 2) і комбінованим розтягом (3) теплостійкої сталі 15X2МФА за температури 20 °С (1) і 350 °С (2, 3).

При зростанні температури від 20 °С до 350 °С діаграма деформування за статичного одновісного розтягу зміщується вниз. При накладанні циклічної складової (комбіноване навантаження)  $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 110$  МПа, пластичність матеріалу посилюється (рис. 2,  $T = 350$  °С), де  $\sigma_{\max}$  і  $\sigma_{\min}$  – максимальний і мінімальний розмах напружень. Діаграму деформування за комбінованого розтягу будували по верхній огинаючій кривій.

Попереднє термомеханічне навантаження всіх зразків здійснювали за температури 350 °С і

$$\bar{K} = \frac{K_1}{K_Q^{5\%}} = 0,85 \text{ за методикою, поданою в [11] (рис. 4)}$$

(де  $K_1$  - коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) при перевантаженні;  $K_Q^{5\%}$  - критичне значення КІН, визначеного за допомогою 5% січної на діаграмі руйнування при температурі 350 °С). При комбінованому ПТН на статичну складову накладали циклічну складову з контрольованим КІН  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = 20 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , зберігаючи максимальне значення КІН  $K_1$  сталим. НДС у вістрі тріщини розраховували за навантажень, близьких до експериментально встановлених значень в'язкості руйнування  $K_f$ .

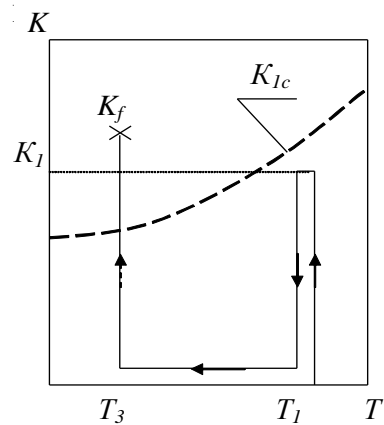


Рисунок 4 - Схема ПТН з повним розвантаженням.

### Результати розрахунку та їх обговорення

Криві розподілу нормальних напружень  $\sigma_y$  у площині, перпендикулярній напрямку дії сили, за статичного ПТН ( $K_I = 94,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ,  $T = 350$  °С) і комбінованого ПТН ( $K_I = 94,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ,  $\Delta K = 20 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ,  $T = 350$  °С), а також після розвантаження представлено на рис. 5. При статичному ПТН напруження  $\sigma_y$  в околі тріщини більші ніж при комбінованому ПТН за однакового КІН  $K_I$  (рис. 5).

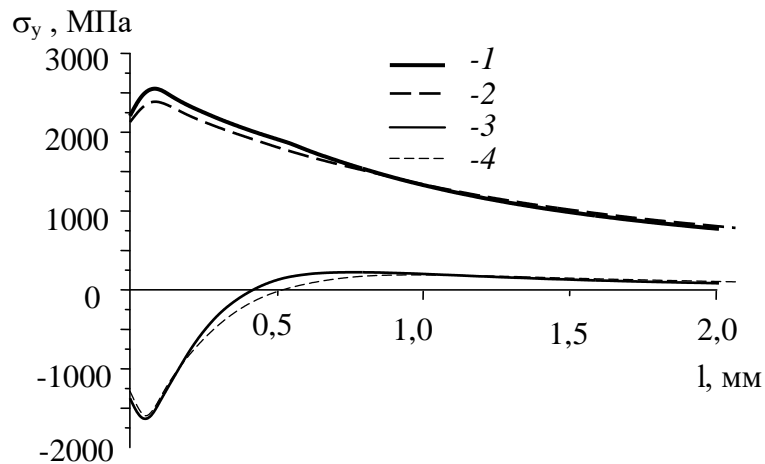


Рисунок 5 - Розподіл нормальних напружень (1, 2) і залишкових стискувальних напружень після розвантаження (3, 4) у вістрі тріщини за статичного (1, 3) та комбінованого (2, 4) ПТН ( $K_I = 94,0 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ ,  $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Після розвантаження зразка, підданого комбінованому ПТН, крива розподілу залишкових стискувальних напружень перетинає вісь абсцис на дещо більшій віддалі від аналогічної кривої після статичного ПТН.

На рис. 6 подано криві розподілу нормальних пластичних деформацій спереду вістря тріщини за вказаних вище умов статичного та комбінованого ПТН. Очевидно, що при комбінованому ПТН збільшення довжини ділянки пластичних деформацій приблизно на 30% є причиною зростання рівня і довжини ділянки дії залишкових стискувальних напружень спереду вістря тріщини.

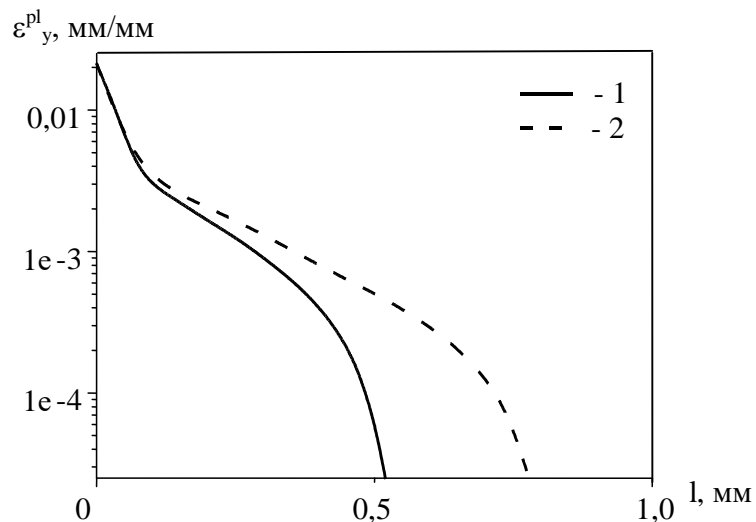


Рисунок 6 - Розподіл нормальних пластичних деформацій у вістрі тріщини за ПТН (1) і комбінованого ПТН (2) при  $K_I = 80,0 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ ,  $\Delta K = 20,0 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$  і  $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Експериментально встановлено значення критичного КІН сталі 15Х2МФА: при  $20^\circ\text{C}$   $K_{IC} = 80 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$  [12]. МСЕ досліджували вплив статичного і комбінованого ПТН на розподіл нормальних напружень  $\sigma_y$  і розподіл еквівалентних напружень за Мізесом при  $K_I = K_{IC} = 80 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ .

Розподіл нормальних напружень  $\sigma_y$  спереду вістря тріщини після ПТН і комбінованого ПТН при  $K_I = 80,0 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$  подано на рис. 7 а. Після ПТН і повторного навантаження до  $K_I = 80,0 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$  рівень нормальних напружень значно знижується

(крива 2) порівняно з первісним станом. Однак найменше значення спостерігається після комбінованого ПТН у порівнянні із ПТН (крива 3).

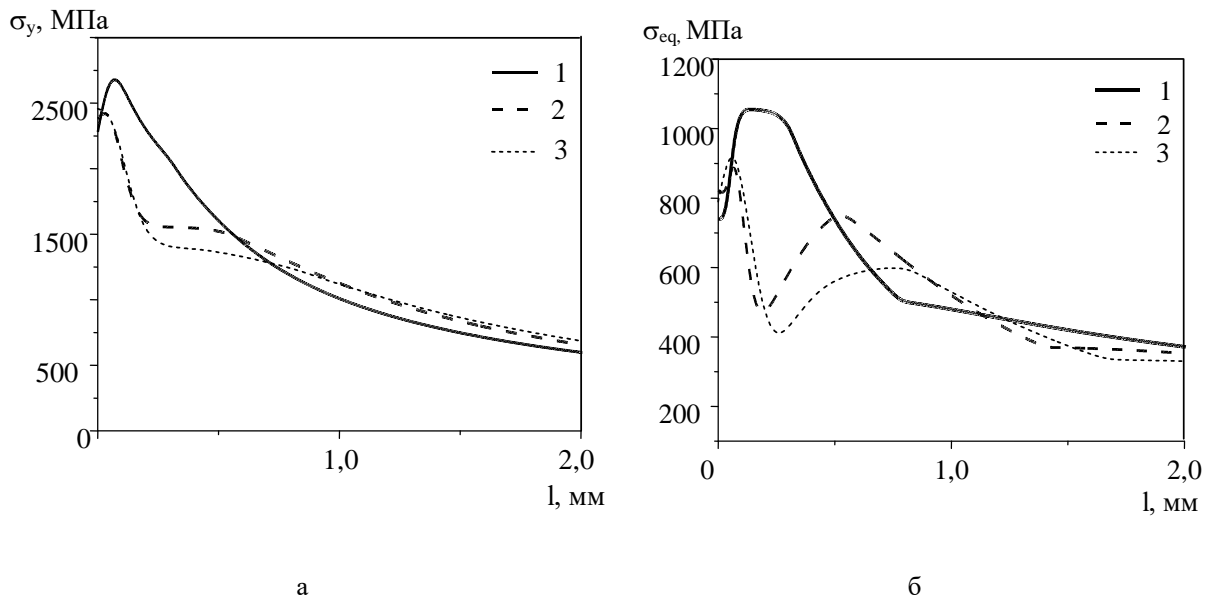


Рисунок 7 - Розподіл нормальних - а та еквівалентних напружень за Мізесом - б у вістрі тріщини при  $K_I = 80 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$  і  $20^\circ\text{C}$ . 1 – у первісному стані; 2 – після ПТН; 3 – після комбінованого ПТН.

Аналогічні закономірності наявні у розподілі еквівалентних напружень за Мізесом  $\sigma_{eq}$  (рис. 7 б). Слід зазначити, що криві розподілу  $\sigma_{eq}$  після ПТН, на відміну від первісного стану, мають ділянки зменшення і зростання напружень на деякій віддалі від вістря тріщини.

### Висновки

1. Методом скінченних елементів досліджено вплив ПТН і комбінованого ПТН на НДС у вістрі тріщини за позacentрового розтягу прямокутних зразків із сталі 15Х2МФА. Виявлено, що накладання циклічної складової за комбінованого ПТН призводить до зменшення нормальних напружень у вістрі тріщини за сталого максимального КІН, а також до збільшення довжини ділянки залишкових стискувальних напружень після розвантаження.

2. Досліджено, що довжина зони пластичних деформацій у вістрі тріщини і нормальні пластичні деформації значно більші від комбінованого ПТН у порівнянні із ПТН.

3. За комбінованого ПТН, у порівнянні із ПТН, спостерігається значне зниження нормальних напружень та еквівалентних напружень за Мізесом спереду вістря тріщини при наступному навантаженні зразка при  $20^\circ\text{C}$  за сталого КІН.

### Література

1. Покровский В.В., Иванченко А.Г. Влияние режимов предварительного термомеханического нагружения на повышение сопротивления хрупкому разрушению теплоустойчивых сталей // Проблемы прочности. – 1999. – №2. – С. 126-138.
2. Pokrovsky V. V., Troshchenko V. T., Kaplunenko V. G., et al. A promising method for enhancing resistance of pressure vessels to brittle fracture // Int. J. Pres. Ves. s Piping. – 1994. – 58. – P. 9 – 24.
3. Nakamura H., Kobayashi H., Kodaira T., Nakarama H. К влиянию предварительного нагружения на вязкость разрушения стали A533B1 // Материалы Международной конференции по разрушению. – Канн, март – апрель 1981. – М.: НИИИинформэнергомаш. – 1985. – Вып. 3. С. 27-38.
4. Reed P.A.S., Knott J. F. An investigation of the warm prestressing (WPS) effect in A533B weld metal // Fatigue Fract. Engin. Mater. Struc. – 1992/ -15, №12. – P. 1251 – 1270.
5. Chell G. G., Haigh J. R., and Vitek V. A. Theory of warm prestressing: experimental validation and the implications for elastic plastic failure criteria // Int. J. Fract. – 1981. – 17, No.1. – P.61-81.

6. Curry D. A. A micromechanistic approach to the warm prestressing of ferritic steel// Int. J. Fract. – 1981. – 17, No.3. – P.335-342.
7. Покровский В., Иванченко А. Прогнозирование влияния предварительного термомеханического нагружения на повышение сопротивления хрупкого разрушения конструкционных теплоустойчивых сталей с трещинами. Сообщение 1. Модель и методика расчета эффекта предварительного термомеханического нагружения// Проблемы прочности. – 2002. - №6. – С. 96-106.
8. Lidbury D. And Birkett P. Effect of warm prestressing on the transition toughness behavior of an A533 grade B class I pressure vessel steel // Fracture Mechanics: Twenty-First Symposium, ASTM STP 1074. – 1990. – P.264-285.
9. Shum D. K. Warm prestress effects in fracture-margin assessment of PWR-RPVS// SmiRT-12/ Ed. K. Kussmaul. – Elsevier Science Publishers, 1993. – P.333-338.
10. Ясній П.В., Гладько В.Б., Гуцайлюк В.Б. Вплив пружно-пластичного деформування на дислокаційну структуру сталі 15Х2МФА // Проблемы прочности. - 2003. - № 6. - С. 30-38.
11. Ясній П., Гуцайлюк В., Пшоняк П. Вплив комбінованого попереднього термомеханічного навантаження на опір крихкому руйнуванню теплостійкої сталі // Вісник ТДТУ. – 2003. – Т.8, №4.- С.5-12.
12. Ясній П.В., Подкозьїн В.Ю., Ковальчук Я.О. Деклараційний патент на винахід 23231А, F16L57/0 Спосіб підвищення стійкості елементу конструкції до поширення тріщин. Оуб. бюл. №4/19.05.1998.

Одержано 27.03.2007 р.

УДК 539.3

**Г.Сулим<sup>1</sup>, докт.фіз.-мат.наук; М.Драган<sup>2</sup>, канд.фіз.-мат.наук;  
Я.Пастернак<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка

<sup>2</sup>Луцький державний технічний університет

## **ПРУЖНА РІВНОВАГА ПЛАСТИНКИ З ТОНКИМ ПРЯМОКУТНИМ ВКЛЮЧЕННЯМ**

*У роботі запропоновано ефективний числово-аналітичний метод аналізу пружної рівноваги необмеженого пружного середовища з тонкостінним включенням довільної жорсткості. Проведено числове дослідження впливу тонкостінного включення різної відносної жорсткості на напружений стан композиції. Вказано на узгодженість результатів, отриманих для абсолютно жорстких і сильно податних включень, з відомими асимптотичними розподілами поблизу вістря жорстких включень і тріщин.*

**G.Sulym, M.Dragan, Ya.Pasternak**

## **ELASTIC EQUILIBRIUM OF THE PLATE WITH THIN RECTANGULAR INCLUSION**

*In this paper the effective numerical-analytical method of the analysis of elastic equilibrium of the infinite elastic medium with thin inclusion of arbitrary rigidity is constructed. Numerical research of the influence of thin inclusion of various rigidity on the stress field in a composite is carried out. Results received for absolutely rigid and very weak inclusions conform to well-known asymptotic distributions near the tip of thin rigid inclusions and cracks.*